关中地区土壤干湿变化及对气候的响应

杨雅青，　张　翀，　张　婕，　王玉丹

（宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室，陕西 宝鸡　721013）

摘　要：关中地区是陕西省主要的农业生产基地，但频发的旱灾严重阻碍了社会经济的发展。土壤湿度作为反映旱灾的一个重要指标，进行土壤湿度对气候因子响应的研究，可为科学认识干旱规律及制定政策提供依据。以关中地区为研究区，采用2001—2020年的MODIS-NDVI与MODIS-LST长时间序列数据，构建了关中地区地表土壤干湿状况（TVDI）特征空间，采用线性趋势法、相关性分析、敏感性分析等统计方法对关中地区土壤干湿状况的空间分布特征及其对气候的响应进行分析。结果表明：（1）TVDI能够较为准确的反演出关中地区的土壤湿度状况。近20 a来，关中地区土壤干湿状况存在变干趋势；其中，春季最旱、冬季次之。（2）土壤干湿状况的空间分布存在明显的空间异质性，整体上呈现西南向东北干旱递增的趋势。（3）土壤干湿状况与降水和气温存在相关性。与降水呈正相关关系，随着降水量增加，土壤湿度增加；与气温呈负相关关系，随着气温升高，土壤湿度降低。（4）降水对土壤干湿状况的敏感性较高，而气温对土壤干湿状况的变化程度起着较大的影响。降水决定了土壤湿度值的增加或减少的方向，而气温则决定了增加或减少的程度。土壤干湿状况是一个综合指标，其值受降水和气温的影响。降水是决定增减趋势的主要因素，而气温则决定了增减的幅度。因此，仅研究气温和降水的影响时，降水是控制土壤干湿状况增减趋势的主要因素，而气温则调节了这种增减的幅度。

关键词：土壤干湿状况；地表温度-植被指数；降水；气温；关中地区

土壤水分是影响植物生长的首要因素，直接决定着植被分布以及农作物产量，同时也是陆-气系统的主要参数，对气候变化起重要作用。传统的土壤湿度监测主要是通过地面观测站获取，虽然精度高，但由于分布不均，代表性差，难以实现大面积的监测，并且要耗费大量的人力物力。随着遥感数据的可获取性增强，基于遥感数据覆盖范围广、更新频率快的优点，被广泛应用到土壤湿度的反演中。1971年首次使用热惯量模型实现遥感监测土壤干湿状况，局限在于对日较差数据有很高的精度要求；此外，目前基于遥感数据反演表层土壤湿度的方法还有植被指数法[1-2]和微波遥感法[3]。温度植被指数（TVDI）是植被指数法的一种，以长时间序列的NDVI和LST为基础进行土壤湿度反演，可以很好的对土壤干旱情况进行精确监测。由于具有温度与植被双重特征，该指数被证明可以有效的反映干旱特征，在土壤湿度监测领域该技术已被广泛应用。目前，国内已有许多学者利用温度植被指数对关中地区干旱进行研究。其中，王鹏欣等[4]指出TVDI能较好的监测关中地区的土壤干湿程度，可用于研究土壤干湿空间变化，且监测结果能很好的与土壤热惯量模型反演的土壤表层含水量结果相吻合。在关中地区土壤湿度空间分布规律上，张晶言等[5]指出渭河平原整体干旱情况要比南部秦岭地区严重，以渭南更为突出，从监测结果来看，TVDI能较好的反映实际土壤干湿状况，适用于本地区干旱的动态监测。

关中地区作为陕西省农业和经济发达的地区，因其远离海洋、身居内陆的独特地理位置，使得干旱成为本地区发生频率最高、持续时间最长、破坏范围最大的自然灾害[6]，并且在本地区的分布也存在较大的空间差异。近年来，由于气候变暖使得土

收稿日期：2023-03-22；　**修订日期**：2023-10-20
基金项目：陕西省社会科学基金项目（2020D008）；陕西省自然科学基础研究计划项目（2021JM-513）；陕西省教育厅科学研究计划项目（21JK0477）；宝鸡文理学院第十五批校级教改资助项目（YJ20JGYB12）
作者简介：杨雅青（1997-），女，硕士，研究方向为土壤水分. E-mail: 936785704@qq.com
通讯作者：张翀. E-mail: zhangch3348@126.com

壤退化、土壤干旱事件频发，严重影响着关中地区的农业生态系统和环境。因此，及时、准确、大范围监测关中地区旱情的发展规律对关中地区的农业生产具有重要的指导意义。

综上，基于MODIS数据(NDVI、LST)，利用线性趋势法、相关分析、偏相关分析、*t*检验、敏感性分析等方法对2001—2020年关中地区土壤干湿时空分布、变化趋势、以及对降水、气温的响应进行分析，以期为关中地区科学合理应对干旱及时调整农业生产提供一定的理论支持。

1 研究区概况

关中地区地处陕西省中部，地处渭河中下游，位于33°35′~35°50′N和106°18′~110°37′E，平均海拔500 m。行政区划上包括五市一区(图1a)，即西安市、宝鸡市、咸阳市、渭南市、铜川市、杨凌示范区。南边以秦岭为界和陕南相隔，北边通过子午岭、黄龙山与陕北为邻(图1b)，东西长400 km，面积约为555×10^4 km^2。关中地区属于大陆性季风气候，夏季潮湿多雨，冬季干燥少雪，处于暖温带半湿润与半干旱气候的过渡地带，多年年均温度6~13 ℃，多年平均降水量为500~700 mm。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

遥感数据选用2001—2020年从NASA(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)下载的MODIS数据产品集：MOD11A2、MOD13Q1，空间分辨率为1 km，时间分辨率分别为8 d、16 d,通过MRT工具进行镶嵌、投影转换、格式转换等预处理，最后用最大值合成法，将NDVI和LST合成为年数据。DEM数据来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)，空间分辨率为90 m的SRTM DEM数字高程模型。

气象数据选用关中平原2001—2020年的年平均气温和降水数据，数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)，分辨率为1 km。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤干湿状况反演 土壤干湿状况变化受多种因素影响，其间存在复杂的作用。研究发现[7]，NDVI和LST相结合构建NDVI-LST特征空间，并提出了温度植被指数TVDI用来估测土壤湿度，根据NDVI-LST特征空间，表达式为[8]：

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (1)$$

式中：LST表示地表温度；LST_{min}表示某一NDVI像元值对应的最小地表温度，对应湿边方程；LST_{max}为表示该NDVI像元值对应的最大地表温度，即为干边方程；TVDI取值范围为0~1，值越大说明土壤越干旱，值越小说明越湿润。

本研究以关中地区为研究对象，基于Matlab图形用户界面(Graphical User Interface，GUI)功能，创建了TVDI批量生成GUI，利用植被覆盖与地表温度数据构建了TVDI，用以反映土壤干湿状况。

通过建立关中地区2001—2020年土壤干湿状况特征空间图可知(图2)，每一年干湿边方程拟合特征都较为相似，基本都呈现出三角形或梯形，这与王汉文等[9]对干湿边方程拟合结果一致。当NDVI值增大时干边上的LST随之减小，呈较稳定的线性关系，而干边上的LST随着NDVI波动比较大。

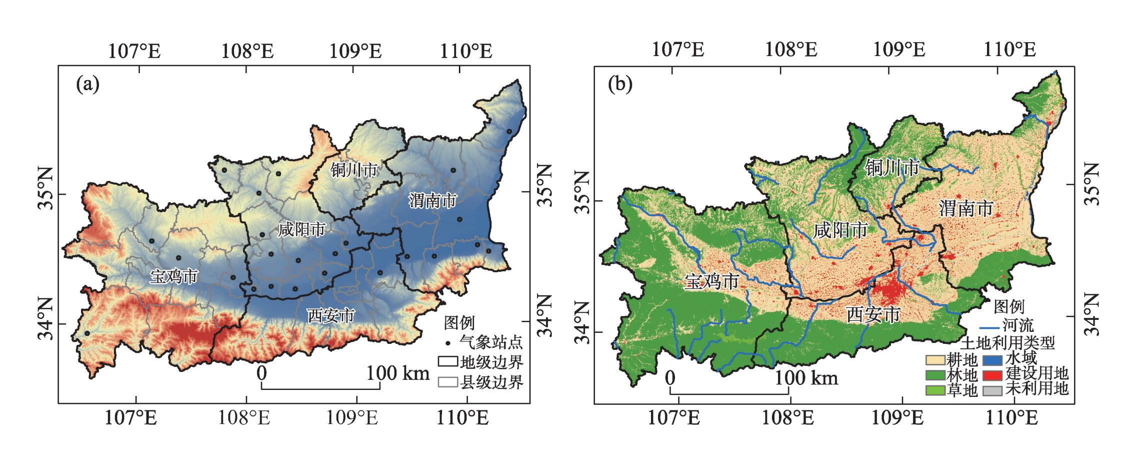


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

参阅相关文献中对土壤干湿状况等级的划分[10]，本文根据反演出的TVDI表示土壤干湿状况，将关中地区土壤干湿状况划分为5类：极湿润（0≤TVDI＜0.2）、湿润（0.2≤TVDI＜0.4）、正常（0.4≤TVDI＜0.6）、干旱（0.6≤TVDI＜0.8）、重旱（0.8≤TVDI≤1）。

2.2.2 线性趋势法 根据TVDI反演得到关中地区2001—2020年土壤干湿状况数据，用线性回归方程进行趋势拟合，方程如下：

$$\hat{y}_i = \theta_{slope} \times t_i + b \tag{2}$$

式中：$\hat{y}_i$ 表示土壤湿度拟合值；i 表示研究时段的年数，范围为1~20；t_i 表示 $\hat{y}_i$ 所对应的时间；θ_{slope} 表示回归系数；b 表示常数；其中，θ_{slope} 和 b 可以采用最小二乘法进行估算，公式如下：

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_1^n (i \times \mathrm{TVDI}_i) - \sum_1^n i \sum_1^n \mathrm{TVDI}_i}{n \times \sum_i^n i^2 - (\sum_1^n i)^2} \tag{3}$$

$$b = \bar{y} - \theta_{slope} \times \bar{t} \tag{4}$$

式中：n 表示研究时序（n=20）；$\bar{y}$ 表示土壤湿度拟合平均值；$\bar{t}$ 表示时间的平均值 。

采用F检验法对土壤干湿状况变化趋势的显著性水平进行检验。

2.2.3 相关分析法 本文先用Person相关分析法研究关中地区2001—2020年土壤干湿状况与降水、气温相关程度的大小，再采用偏相关系数法研究降水、气温对土壤干湿状况的影响程度[11]，最后用t检验对偏相关系数进行显著性检验。

相关性计算公式为[12]：

$$r_{x,y} = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{5}$$

式中：n 表示研究时序（n=20）；$r_{x,y}$ 表示 x、y 之间的相关系数；x_i、y_i 分别为2个变量 x、y 第 i 年的逐个像元值；$\bar{x}$，$\bar{y}$ 为表示两变量20 a的平均值。

基于公式（5）得到的结果，采用偏相关分析对本文涉及的3个变量土壤干湿状况、降水、气温进行分析，计算公式为：

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xy})^2 (1 - r_{yz})^2}} \tag{6}$$

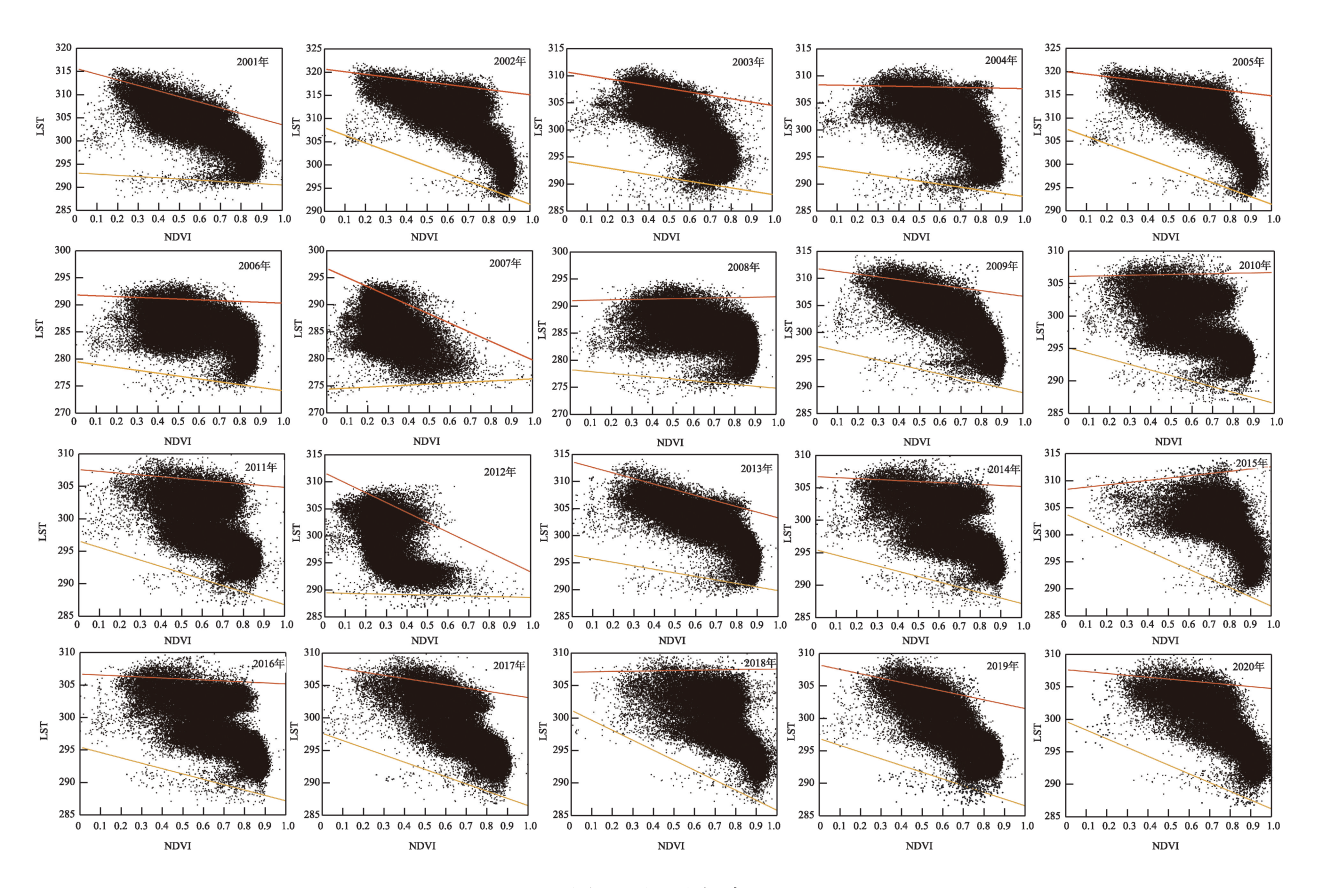


图2 干湿边拟合

Fig. 2 Dry and wet edge fitting diagram

式中：$r_{xy,z}$ 表示固定变量z后变量x、y之间的偏相关系数；r_{xy} 、r_{xz} 、r_{yz} 为公式(5)求得的两变量之间的相关系数。

采用t检验法对偏相关系数的显著性进行检验，公式为：

$$t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1 - r_{xy,z}^{2}}}\sqrt{n - m - 1} \tag{7}$$

式中：m表示自变量个数；n表示样本数。

2.2.4 敏感性分析 为定量的分析土壤干湿状况TVDI变化对气候因子(降水、气温)的响应，本文基于P-M模型的敏感系数法对关中平原土壤干湿状况TVDI对气候因子的敏感性进行分析，计算公式为：

$$S = \lim_{\Delta x = 0}\left(\frac{\frac{\Delta TVDI}{TVDI}}{\frac{\Delta x}{x}}\right) = \frac{\Delta TVDI}{\Delta x} \cdot \frac{x}{TVDI} \tag{8}$$

式中：S表示土壤干湿状况TVDI对气候因子x的变化；S值越大，表示受气候因子的影响越大；ΔTVDI表示Δx引起的TVDI的变化；Δx表示气候因子的变化。

气象因子对土壤干湿状况TVDI的贡献率(C_i)用敏感系数(S_i)与该时间段内气象因子i的相对变化(Rc_i)的乘积表示：

$$C_i = S_i \cdot Rc_i \tag{9}$$

$$Rc_i = N \cdot Trend_i / |av_i| \cdot 100\% \tag{10}$$

式中：N表示研究时段(20)；$Trend_i$ 表示气候因子i的线性趋势变化；$|av_i|$表示气象因子i多年均值的绝对值。

3 结果与分析

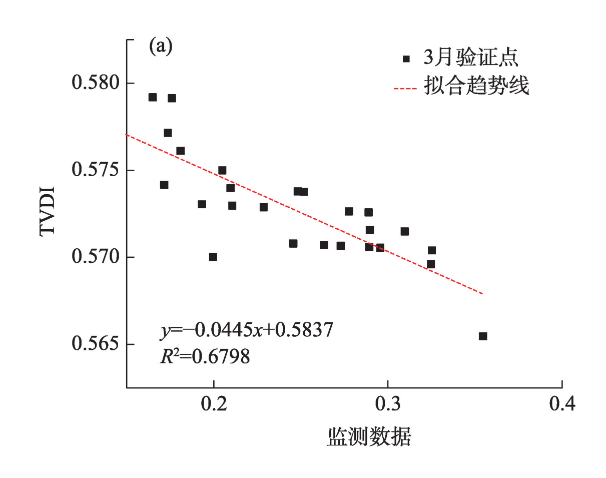
3.1 土壤干湿状况反演结果验证

目前，TVDI已被广泛应用，并且监测的准确性较高，为了验证本文反演结果的可靠性，结合众多学者提出的TVDI能较好的反映地表10 cm以内的土壤表层干湿状况[13]，故本文选取0~10 cm的土壤湿度监测数据对结果进行验证。基于站点数据存在无效的情况，本文选取2009年26个站点3月、7月的数据作为验证数据。验证结果表明，选取的3月、7月监测数据与TVDI之间相关系数为0.6798、0.4377，均通过了$P \leq 0.05$显著性检验，表明两者间相关性良好，并且从图3可以看出，两者呈显著性负相关。结果表明，本文用TVDI反演关中地区的土壤干湿状况是可行的。

3.2 土壤干湿状况时空分布特征

3.2.1 土壤干湿状况时间变化特征 土壤干湿状况和TVDI存在一定的关系，TVDI在一定程度上可以反映土壤干湿状况的变化，虽然，TVDI只是近似指标，但经过结合实地观测验证可知，在本地区用TVDI的结果表示土壤干湿状况其结果是准确可靠的，孙灏等[14]对目前现有的13种干旱遥感监测指数进行综合分析之后，总结得出对于干旱监测而言，TVDI指数是最为有效的指数；因此，本文选择采用TVDI指数监测土壤干湿状况变化是科学合理的。

从关中地区土壤干湿状况年变化图(图4)可知，近20 a以来，关中地区发生干旱的程度不同，均



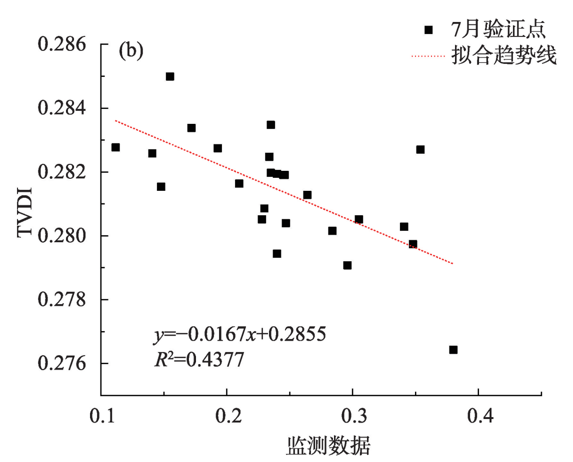


图3 2009年3月、7月监测数据与同期TVDI值拟合

Fig. 3 Fitting diagram of monitoring data from March and July 2009 and TVDI values during the same period

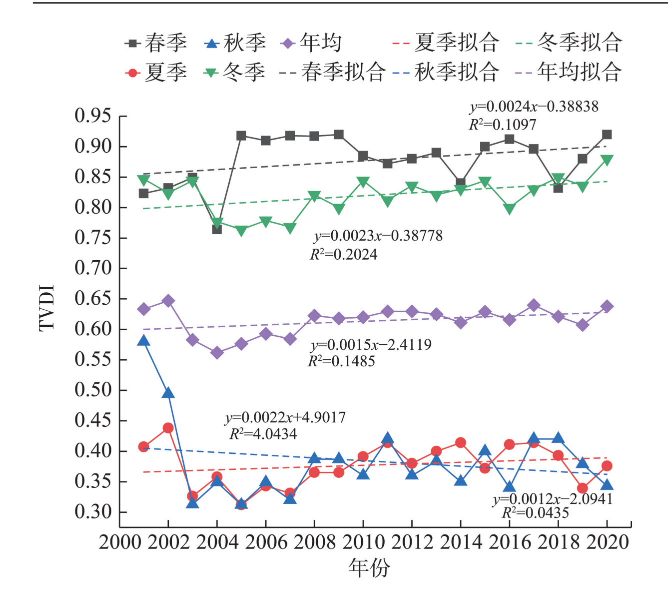


图4　2001—2020年关中地区全年及各季土壤干湿状况时间变化

Fig. 4　Spatial distribution of dry and wet soil conditions in Guanzhong region from 2001 to 2020

值为0.615,根据所划分的干旱等级,关中地区整体处于干旱状态;整体呈不规则波动变化趋势,2002年的旱情最为严重,达到了0.647;2004年旱情最弱,值为0.562;其余年份在0.60上下小幅波动。

为了解关中地区土壤干湿状况不同季节的变化,将月土壤干湿状况按季节进行平均,得到春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月至次年2月)的土壤干湿状况值。分析图4可知,2001—2020年期间,春季干旱程度最为严重,均值为0.877,属于重旱级别,波动性比较大,但都处于0.76~0.925之间。夏秋两季曲线大致相似,干旱程度为一年中最小的时期,介于0.3~0.5之间,属于湿润等级。冬季土壤干湿状况曲线走势和全年土壤干湿状况曲线走势较为接近。春季土壤湿度增速为四季最大($0.0024\cdot a^{-1}$),呈较明显的增加趋势,在2004年、2014年、2018年出现突变;冬季的增速略微低于春季($0.0023\cdot a^{-1}$);夏季的减小速率最低($0.0012\cdot a^{-1}$),2001年、2002年土壤湿度值异常减小,远低于平常年;秋季为土壤湿度值唯一增加的季节($0.0022\cdot a^{-1}$),呈不明显增加趋势。通过对比四季土壤干湿状况趋势可知,年均土壤干湿状况降低很大程度上是春冬两季土壤湿度降低的结果,其中,春季的贡献略微大于冬季,最终在夏秋两季的影响下,年均土壤干湿状况变化呈现出不显著减小趋势($0.0015\cdot a^{-1}$)。春季气温回暖,植物开始生长发育,在此期间由于降雨量少,植物只能从土壤中汲取水分以满足生长发育的需求,从而导致土壤含水量逐渐减小。到了夏季植物生长发育达到旺盛期,植被覆盖量达到最大,同时降水量也达到了一年最大,这就使得降水补给远大于植物生长所消耗的水分,土壤状况从而呈现出湿润状态。秋季植物进入衰退期,所需水分大大减少,降水量依旧很多,土壤水分供大于求,大量的水分得以保存下来,使土壤呈现出湿润状态。冬季,植物进入休眠期所需水分减少,但与此同时降水减少,最终土壤状况呈现出干旱。由此可以得出,土壤干湿状况和植被之间存在着密切的关系[15]。此外,关中地区各土壤干湿状况类型占比结果表明(图5),2001年、2002年、2020年土壤干旱程度最为严重,干旱面积占比多达60%;2003年、2007年土壤干旱程度最弱,干旱面积占比仅为40%;其他年份干旱和湿润占比差值较小。

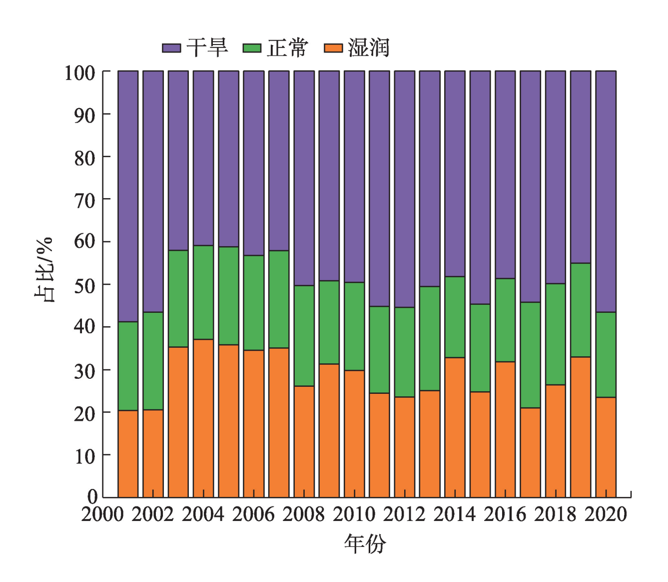


图5　2001—2020年关中地区土壤干湿状况类型占比

Fig. 5　Percentage of dry and wet soil conditions types in Guanzhong area from 2001 to 2020

3.2.2　土壤干湿状况空间分布及变化趋势　近20 a间关中地区土壤干湿状况的空间分布图(图6)大致呈现出从西南到东北增加的空间规律,即干旱程度从西南到东北逐渐增加。峰值区域主要为渭河流域沿岸,尤其是渭南市中部(蒲城市、澄城县、合阳县)基本在0.8以上,属于特旱级别。谷值区域在宝鸡市太白县,值在0.2以下,属于极湿润状态。结合图1的DEM图和土地利用图发现,土壤湿度较高的地区海拔高、土地利用类型为林地或者草地,而在海拔较低、土地利用主要为耕地的渭河流域沿岸地

区，土壤湿度值普遍较低。根据李俊霖等[16-17]的研究，关中地区中东部地区大陆性气候有显著增强的趋势，尤其是东部的渭南地区，这也很好的解释了渭南市重旱的空间分布大于其他地区。

采用线性趋势法分析关中地区20 a间土壤干湿状况年际变化趋势，本文 θ_{slope} >0.01 表示土壤干旱程度增加；θ_{slope} < −0.01 表示土壤干旱程度减弱，−0.01< θ_{slope} <0.01 表示土壤干湿状况情况不变。从图7b土壤干湿状况变化趋势的空间分布来看，关中地区近20 a来土壤干湿状况以减小趋势为主，空间分布上差异较明显。中部渭河流域沿岸以增加趋势为主，西南部和东北部则以减少趋势为主。土壤湿度增加的区域主要集中在宝鸡市陇县东北部、金台区，西安市周至县东北部；显著增加的区域主要

2001年 2002年 2003年 2004年 2005年
2006年 2007年 2008年 2009年 2010年
2011年 2012年 2013年 2014年 2015年
2016年 2017年 2018年 2019年 2020年

0 100 km N

图例
极湿润 湿润 正常 干旱 特旱

图6 2001—2020年土壤干湿状况空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of 2001 to 2020 dry and wet soil conditions

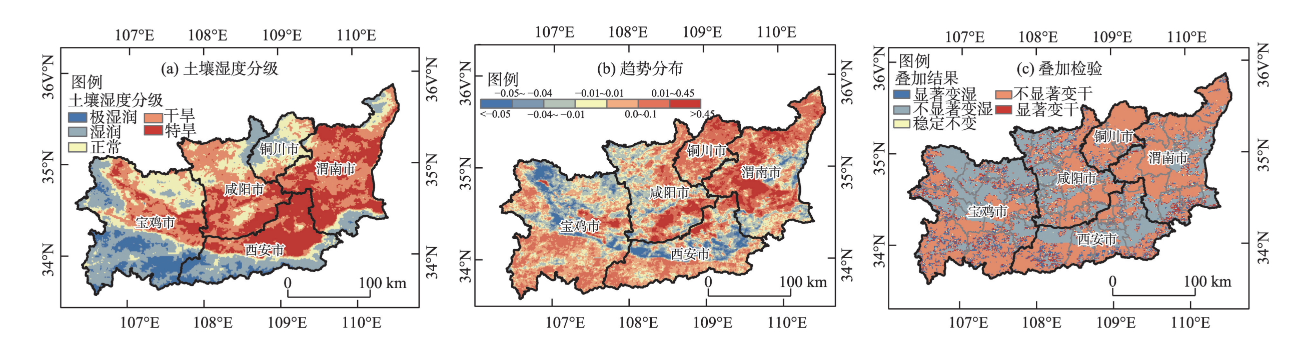


图7 土壤干湿总体状况及显著性检验的空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of the overall condition and significance test of soil moisture and dryness

集中在渭南市大荔县、临渭区、蒲城县三个县区相交地带。对土壤干湿状况变化趋势进行*F*检验,当$\alpha=0.05$时,阈值为4.41,根据阈值将显著性分为显著($|Th|>4.41$)、不显著($|Th|<4.41$)两类。将显著性与变化趋势叠加得到5个类型(表1):显著变湿、不显著变湿、稳定不变、不显著变干、显著变干。如图7c所示,原来较为湿润的宝鸡太白县、凤县,铜川市有不显著变干的趋势;在秦岭北麓林地向草地、耕地的过渡地带(从宝鸡中南部一直向东延伸到渭南市南部边界)、宝鸡市中东部以及咸阳市中西部土壤湿度则呈现出不显著变湿;显著变湿、显著变干的区域零星分布,没有明显的聚集区。总的来说,变干的区域占比达到50%以上,变湿的区域占比为35%,所以土壤干湿状况整体表现为变干趋势。

表1　土壤干湿状况趋势显著性等级划分

Tab.1　Dry and wet soil conditions trend significance anking

θ_{slope}	Th	
	$|Th|<4.41$	$|Th|>4.41$
$\theta_{slope}<-0.001$	不显著变湿	显著变湿
$-0.001<\theta_{slope}<0.001$	稳定不变	稳定不变
$\theta_{slope}>0.001$	不显著变干	显著变干

注:*Th*表示进行*F*检验的值。

3.3　土壤干湿状况对降水、气温的响应

干旱是降水与水分蒸散不平衡造成的土壤水分异常短缺现象,所以,干旱与降水、气温之间存在一定的相关关系,本文结合2001—2020年关中地区的降水、气温数据与采用TVDI表示的土壤干湿状况进行相关分析得到相关系数空间分布图、*t*检验结果的显著性分布图,进行敏感性分析得到土壤干湿状况对降水、气温的敏感性系数表,定性定量的分析了土壤干湿状况对降水、气温的响应。

3.3.1　土壤干湿状况与降水、气温的相关性分析　降水作为关中地区地表水分的首要来源,对本地区土壤干湿状况的变化起着举足轻重的作用。2001—2020年关中地区土壤干湿状况与年均降水量的相关关系的结果表明,土壤干湿状况与降水之间为正相关关系,即随着降水的增大,土壤变湿润。统计结果表明(图8a),正相关区域占总区域面积的69%,分布范围极其广泛,其中,不显著正相关的区域占比61.7%,显著性正相关占比7.3%;负相关的区域占比18.9%,零星的分布在宝鸡(凤翔)、咸阳(彬州、长武)、渭南(富平、大荔、潼关、华阴),其中,显著性负相关占比仅为1.9%。从偏相关*t*检验的结果来看,土壤湿度与年均降水之间的偏相关系数也是以正相关为主,占全域面积的52.8%。与正相关系数相比偏相关系数减少了16.2%,表明在降水对土壤湿度的影响中气温起了16.2%的作用。

气温对土壤干湿状况也有重要影响,温度升高导致土壤蒸散量增加,水的热容量远超过土壤的热容量,升温势必会造成土壤潜热减小、感热增加,进而导致土壤表层温度进一步升高,所以,升温和土壤干湿状况之间以显著性负相关为主。并且这是一个正反馈过程,若不破坏这一过程,土壤干旱程度会日趋严重,最终形成土壤荒漠化。2001—2020年关中地区土壤干湿状况与年均气温的相关系数、*t*检验结果均表明:土壤干湿状况与年均气温之间以负相关为主,即随着气温的升高,土壤湿度降低。在图8b土壤干湿状况与气温的相关系数统计中可以看出,负相关占总面积的75.5%,正相关的占比仅为12%。剔除降水的影响后,从偏相关系数可以看出,负相关的面积占66.8%(图8d),与相关系数相比减少了8.7%,表明在气温与土壤湿度的影响中降水起到了8.7%的作用。

以上结果表明,降水、气温对土壤干湿状况存在交互作用,仅用相关性不能全面反映两者与土壤干湿状况之间复杂的作用关系,要通过偏相关进行客观分析。通过对比两者对土壤干湿状况的交叉作用:气温(16.2%)、降水(8.7%),表明就相关性来看,气温与关中地区土壤干湿状况的相关性更大,与庞素菲等[17]得出的结论一致。

3.3.2　土壤干湿状况与降水、气温的敏感性分析　综上所述,土壤干湿状况与降水、气温之间存在密切的关系,本文将采用敏感系数法定量分析土壤干湿状况对降水、气温的敏感性。

由表2、表3可知,就整个关中地区来看,土壤干湿状况对降水(−0.425)、气温(0.2788)均为高度敏感,降水的敏感系数均大于气温的敏感系数且全为负值,说明土壤干湿状况对降水更为敏感且降水的增加会引起土壤湿度增加,与上文所得结论一致。就季节来看,对降水最敏感的是秋季,对气温最敏感的是夏季;对降水的敏感性进行排序:秋季>冬季>春季>夏季,对气温的敏感性排序:夏季>春季>秋季>冬季,这种变化与本地区气候特征相一致。

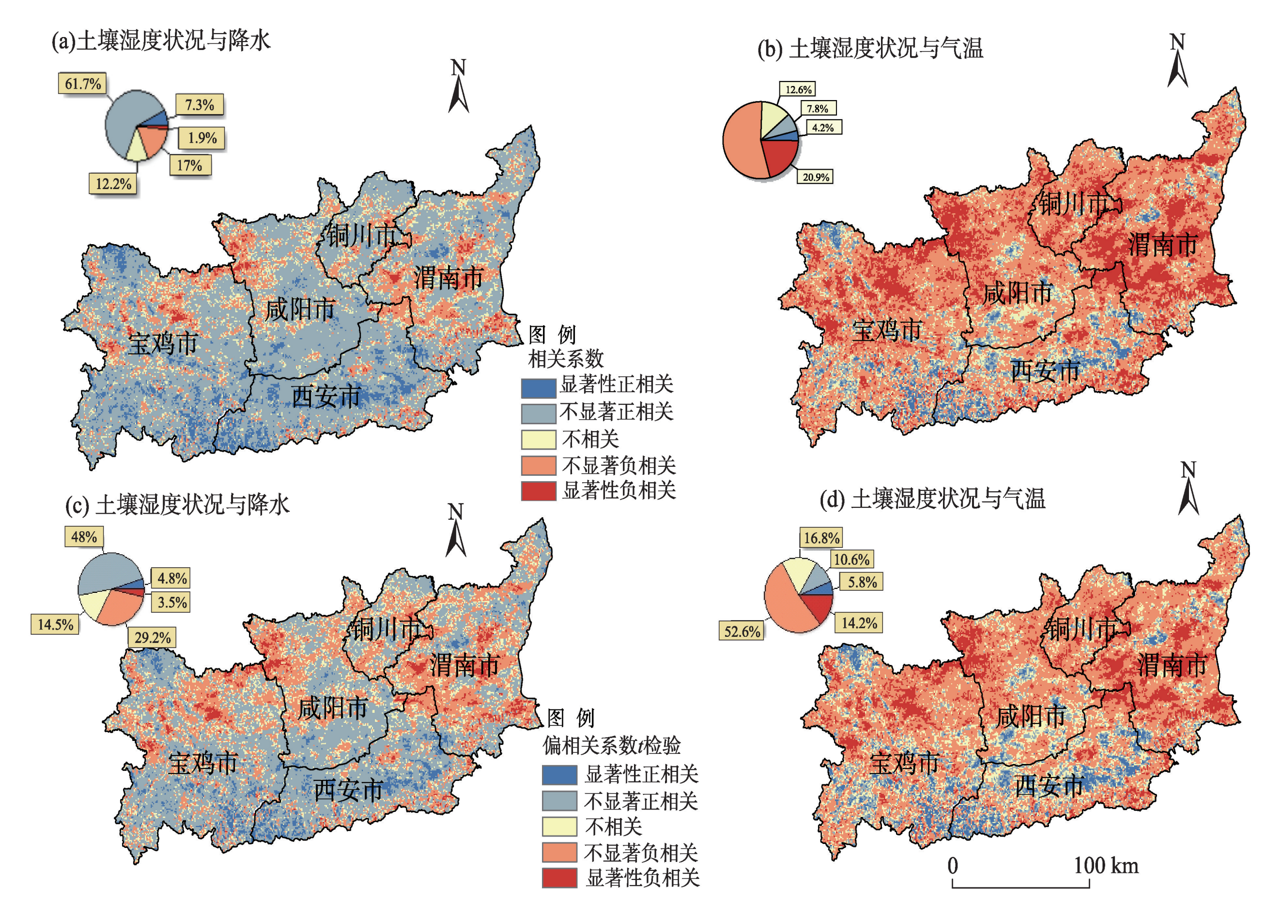


图8 土壤干湿状况与降水、气温的相关系数及偏相关t检验

Fig. 8 Correlation coefficient and partial correlation t-test of dry and wet soil conditions with precipitation and temperature

表2 敏感度等级划分

Tab. 2 Sensitivity classification

敏感性系数S	敏感性等级
$0 < \|S\| < 0.05$	不敏感
$0.05 < \|S\| < 0.2$	中度敏感
$0.2 < \|S\| < 1$	高度敏感
$\|S\| > 1$	极度敏感

表3 关中各地区敏感系数

Tab. 3 Sensitivity coefficient of each region in Guanzhong

地区	降水敏感系数	气温敏感系数
关中地区	−0.4252	0.2788
西安	−0.557	0.316
铜川	−0.463	0.305
宝鸡	−0.624	0.419
咸阳	−0.302	0.184
渭南	−0.28	0.17

按地区对降水敏感系数、气温敏感系数进行排序，结果均为：宝鸡>西安>铜川>咸阳>渭南，这主要归因于秦岭主峰太白山位于宝鸡市的太白县，是关中地区降水最多、气温最低的地区从而导致宝鸡市降水量、气温差值最大，使得宝鸡市的敏感系数高于其他地区。这种变化与降水、气温空间上的变化类似，说明敏感系数存在地区差异，而且这种差异是由降水、气温引起的。

根据公式(10)得到的贡献率表4可以看出，对土壤干湿状况贡献最大的是气温；从季节上来看，冬季、春季气温的贡献率高于降水，夏季两者贡献率大致相当，秋季刚好相反降水的贡献要大于气温。

综合分析，土壤干湿状况对降水的敏感性系数高贡献率较低；对气温的敏感系数低贡献率高，敏感性系数决定着土壤湿度变化方向(增加或者减少)，贡献率主要是对增加减小的程度起作用。所以降水控制着土壤干湿状况值增加还是减少，气温决定着增加还是减少的程度；两者共同控制着土壤干湿状况的变化。

4 结论与讨论

本文基于2001—2020年的MODIS(NDVI、TV-

表4 季节敏感系数及贡献率

Tab. 4 Seasonal sensitivity coefficient and contribution rate

时间	降水敏感系数	气温敏感系数	降水贡献率/%	气温贡献率/%
全年	−0.4252	0.2788	−25.2	84.9
春季	−0.377	0.32	5	20.9
夏季	−0.338	0.397	−14.9	15.2
秋季	−0.539	0.282	−32.3	12.7
冬季	−0.444	0.086	17	36.1

DI）遥感数据，采用TVDI监测关中地区土壤干湿状况长时间序列变化，得出以下结论：

（1）TVDI能够较好地反演出关中地区的土壤干湿状况；关中地区土壤干湿状况整体呈现出四周比中部湿润、南部比北部湿润、从西南到东北干旱递增的趋势；在这20 a间，土壤干湿状况增加的速率显著高于减少的速率。

（2）研究关中地区土壤干湿状况和降水、气温的相关关系，结论表明与年均降水为正相关关系、与年均气温为负相关关系；降水、气温对土壤湿度变化存在交叉作用，且气温的交叉结果大于降水。

（3）研究关中地区土壤湿度和降水、气温的敏感系数，结论表明关中地区土壤干湿状况对降水敏感系数大于气温；从贡献率来看，年均降水的贡献率小于年均气温的贡献率，春冬两季气温贡献大于降水贡献、夏季两者相当、秋季降水贡献大于气温贡献。

虽然，TVDI能很好的对土壤干湿状况进行监测，但土壤干湿状况受气候因子、高程、土地利用方式、土壤自身理化性质、土层深度等因素的综合作用，并且其自身的变化也存在一定的周期性，因此，本文分析的2个气候因子不足以解释引起土壤干湿状况变化的所有信息。针对本文的不足，可以考虑影响土壤干湿状况的多个因子进行综合分析，得到确切完全的影响土壤干湿状况的所有信息，更好的指导本地区的农业生产实践。

参考文献（References）：

[1] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用[J]. 环境遥感, 1994, 36(2): 106−112. [Chen Weiying, Xiao Qianguang, Sheng Yongwei. Application of the anomaly vegetation index to monitoring heavy drought in 1992[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 36(2): 106−112.]

[2] Kogan F N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(5): 655−668.

[3] 郑兴明, 赵凯, 李晓峰, 等. 利用微波遥感土壤水分产品监测东北地区春涝范围和程度[J]. 地理科学, 2015, 35(3): 334−339. [Zheng Xingming, Zhao Kai, Li Xiaofeng, et al. Moisture derived from microwave remote sensing in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(3): 334−339.]

[4] 王鹏新, 蔡健雅, 李晓文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报, 2001, 26(5): 413−417. [Wang Pengxin, Cai Jianya, Li Xiaowen. Vegetation-temperature conditional index and its application for drought monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5): 413−417.]

[5] 张晶言, 白建军, 于茜. 基于TVDI模型的关中地区春旱时空动态监测[J]. 兰州大学学报, 2017, 53(6): 800−806. [Zhang Jingyan, Bai Jianjun, Yu Qian. Spatial-temporal dynamic monitoring of spring drought based on TVDI model in the Guanzhong region [J]. Journal of Lanzhou University, 2017, 53(6): 800−806.]

[6] 何慧娟, 卓静, 李红梅, 等. 基于MOD16产品的陕西关中地区干旱时空分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 36(1): 236−241. [He Huijuan, Zhuo Jing, Li Hongmei, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of drought in Guanzhong region of Shaanxi Province based on MOD16 products[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 36(1): 236−241.]

[7] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 421−427. [Qi Shuhua, Wang Changyao, Niu Zheng. Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index (TVDI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(5): 421−427.]

[8] 刘英, 马保东, 吴立新, 等. 基于NDVI-ST双抛物线特征空间的冬小麦旱情遥感监测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 55−63. [Liu Ying, Ma Baodong, Wu Lixin, et al. Drought remote sensing for winter wheat based on double parabola NDVI-ST space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 55−63.]

[9] 王汉文, 原喜忠, 雷胜友, 等. 基于TVDI的不同土地类型土壤湿度趋势研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 50−60. [Wang Hanwen, Yuan Xizhong, Lei Shengyou, et al. Study on soil moisture trend of different land types based on TVDI[J]. Journal of Henan University of Polytechnic (Natural Science), 2020, 39(5): 50−60.]

[10] 程伟, 辛晓平. 基于 TVDI 的内蒙古草地干旱变化特征分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2728-2742. [Cheng Wei, Xin Xiaoping. Analysis of spatial-temporal characteristics of drought variation in grassland area of Inner Mongolia based on TVDI[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(13): 2728-2742.]

[11] Hu Ling, Fan Wenjie, Ren Huazhong, et al. Spatiotemporal dynamicsin vegetation GPP over the great Khingan Mountains usingGLASS products from 1982 to 2015[J]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 488-500.

[12] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋, 等. 1960—2014年北京感知温度变化特征及其敏感性分析[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 175-184. [Li Shuangshuang, Yang Saini, Liu Xianfeng, et al. Changes in outdoor thermal sensation and sensitivity to climate factors in Beijing from 1960 to 2014[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 175-184.]

[13] 薛天翼, 白建军. 基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 240-246. [Xue Tianyi, Bai Jianjun. Spatiotemporal variations of spring drought based on TVDI and meteorological index in Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 240-246.]

[14] 孙灏, 陈云浩, 孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 147-154. [Sun Hao, Chen Yunhao, Sun Hongquan. Comparisons and classification system of typical remote sensing indexes for agricultural[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14): 147-154.]

[15] 张翀, 雷田旺, 宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2128 - 2038. [Zhang Chong, Lei Tianwang, Song Dianxing. Analysis of temporal and spatial characteristics of time lag correlation between the vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2128-2038.]

[16] 李俊霖, 延军平, 孙虎, 等. 关中平原东、中、西部气候干旱化程度比较分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(1): 131-134. [Li Junlin, Yan Junping, Sun Hu, et al. All analysis on the climatic changes in east, middle, and west areas of Guanzhong Plain[J]. Journal of Aria Land Resources and Environment, 2005, 19(1): 131-134.]

[17] 庞素菲, 魏伟, 郭泽呈, 等. 基于 TVDI 的甘肃省农业旱情特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1849-1860. [Pang Sufei, Wei Wei, Guo Zecheng, et al. Agricultural drought characteristics and its influencing factors in Gansu Province based on TVDI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1849-1860.]

Changes in soil moisture and dryness and their response to climate change in the Guanzhong region

YANG Yaqing, ZHANG Chong, ZHANG Jie, WANG Yudan
(Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation in Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, Shaanxi, China)

Abstract: The Guanzhong region serves as the main agricultural production base in Shaanxi Province. However, frequent droughts severely impede socioeconomic development in the area. Soil moisture, a vital drought indicator, can offer valuable insights into understanding drought laws and formulating policies to address them by studying the response of soil moisture to climate factors. Within the Guanzhong region, long-term MODIS-NDVI and MODIS-LST series data from 2001 to 2020 were used to establish the characteristic spatial distribution of surface soil moisture and dryness (TVDI). The linear trend method, correlation analysis, sensitivity analysis, and other mathematical statistical methods were used to scrutinize the spatial distribution patterns of soil moisture and dryness in response to climate conditions. Key results are as follows: (1) TVDI can accurately reflect soil moisture status in the Guanzhong region, revealing a trend of both soil drying and wetting over the past two decades, with spring being the driest, followed by winter. (2) There is significant spatial heterogeneity in soil moisture distribution and dryness, with an overall trend of increasing drought from the southwest to the northeast. (3) Soil moisture exhibits correlations with precipitation and temperature: it is positively correlated with precipitation (as precipitation increases, soil moisture increases) and negatively correlated with temperature (as temperature increases, soil moisture decreases). (4) Precipitation has a high sensitivity to soil moisture and dryness, while temperature significantly impacts the degree of changes in soil moisture and dryness. Precipitation determines the direction in which soil moisture values increase or decrease, whereas temperature determines the degree of increase or decrease. Soil dryness and wetness act as comprehensive indicators, influenced by both precipitation and temperature. Precipitation predominantly determines the trend of value increase or decrease, while temperature determines the magnitude of the increase or decrease. Hence, when studying the impacts of temperature and precipitation, precipitation emerges as the main factor controlling soil moisture and dryness trends, while temperature regulates the extent of these changes.

Keywords: dry and wet soil conditions; surface temperature vegetation index; precipitation; temperature; Guanzhong region